

# To drain or not to drain : quantification of drainable intravascular venous volume during extracorporeal life support

Citation for published version (APA):

Simons, A. P. (2010). *To drain or not to drain : quantification of drainable intravascular venous volume during extracorporeal life support*. [Doctoral Thesis, Maastricht University]. Datawyse / Universitaire Pers Maastricht. <https://doi.org/10.26481/dis.20100623as>

## Document status and date:

Published: 01/01/2010

## DOI:

[10.26481/dis.20100623as](https://doi.org/10.26481/dis.20100623as)

## Document Version:

Publisher's PDF, also known as Version of record

## Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

## General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.umlib.nl/taverne-license](http://www.umlib.nl/taverne-license)

## Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[repository@maastrichtuniversity.nl](mailto:repository@maastrichtuniversity.nl)

providing details and we will investigate your claim.

## SUMMARY

Extracorporeal life support (ELS) systems provide mechanical cardiopulmonary assistance by relieving the heart from hemodynamic load while organ perfusion is maintained. With veno-arterial ELS, intravascular volume is directly drawn from the venous circulation, typically by a centrifugal blood pump which then pumps the blood through an artificial lung into the arterial system. Today, ELS is used in a wide field of applications, such as (postcardiotomy) heart failure, percutaneous interventions, and respiratory failure.

The physical interaction between the ELS system and patient circulation in relation to the venous intravascular volume is studied in Chapter 2. The chapter provides a rationale for a new method, using pump speed manipulations to detect and reverse venous collapse resulting from low circulatory filling.

Venous drainage starts at the tip of the venous cannula. Chapter 3 investigates tip designs of five different cannulae used for central venous cannulation. When intravascular volume becomes critically low and the cannula inlet holes become obstructed, a cannula featuring a grooved and swirled tip shows slightly better drainage performance. In contrast, the study found no difference in performance between the various cannula designs when intravascular volume is sufficient.

In patients supported by a minimized extracorporeal bypass system, intravascular volume can be assessed using the dynamic filling index (DFI). Chapter 4 shows proof of principle of DFI measurement in patients undergoing coronary artery bypass grafting. The index proved more sensitive to small changes in intravascular drainable volume than routinely recorded parameters, which suggests good potential for the DFI to monitor 'on pump' venous return.

A pump control combining DFI measurement and pump speed adjustment results in a reserve-driven flow control scheme. Chapter 5 illustrates the action of such a reserve-driven pump control applied to ELS in an experimental setting, in which DFI measurement continually assesses drainable venous intravascular volume and pump speed is adjusted if drainable volume is below a certain threshold, enabling maximum level of support despite low filling conditions.

The use of the DFI to assess venous volume may be used to detect changes in cardiac pump reserve capacity when weaning from ELS. Chapter 6 presents a case report of a patient supported by ELS and in which DFI measurements were performed regularly. During attempts of weaning (i.e. decrease in bypass flow and thereby reloading the heart), the DFI confirmed findings on cardiac pump function found by transesophageal echocardiography and standard blood pressure monitoring.

Finally, Chapter 7 presents a Letter to the Editor of the journal 'Artificial Organs'. The letter discusses an ELS circuit using a new pulsatile centrifugal pump presented by Herreros et al. (abstract and figures in Appendix). In addition, response of the Spanish group is given as well.

This thesis provides a first step in the development towards an ELS system which is able to match mechanical cardiopulmonary support to the patient's cardiovascular system. The results of the studies presented here are helpful to understand the interaction between the extracorporeal circuit and the patient's vascular system. An in-depth understanding of the interaction is crucial to optimize cardiopulmonary support.



## SAMENVATTING

Extracorporale life support (ELS) systemen leveren mechanische cardiopulmonale ondersteuning door het hart hemodynamisch te ontlasten terwijl orgaanperfusie behouden blijft. Bij veno-arteriële ELS wordt intravasculaire volume direct uit het veneuze vaatbed genomen, veelal door een centrifugale bloedpomp welke vervolgens het bloed door een kunstlong naar het arteriële vaatsysteem pompt. Tegenwoordig kent ELS een breed toepassingspectrum, waaronder gebruik bij (postcardiotomie-)hartfalen, bij percutane interventies en bij longfalen.

De fysische interactie tussen het ELS systeem en het veneuze intravasculaire volume van de patiënt wordt bestudeerd in Hoofdstuk 2. Dit levert een rationale voor een nieuwe methode welke gebruik maakt van manipulaties van de pompsnelheid om veneuze collaps ten gevolge van lage circulatoire vulling te detecteren en ongedaan te maken.

De veneuze drainage begint bij de inlaatopening van de veneuze canule. Hoofdstuk 3 onderzoekt verschillende ontwerpen van canules welke gebruikt worden voor centraalveneuze canulatie. Wanneer het intravasculaire volume kritisch laag wordt en de inlaatopeningen van de canule geobstrueerd raken, toont een canule met gedraaide groeven in de punt een betere drainagecapaciteit. In tegenstelling tot de situatie van extreem lage vulling, kon de studie geen verschil aantonen in drainage capaciteit tussen de verschillende canule-ontwerpen wanneer het intravasculaire volume toereikend is.

Hoofdstuk 4 introduceert de dynamische vullingsindex (dynamic filling index, DFI), waarmee het intravasculaire volume kan worden bepaald bij patiënten die worden behandeld met ELS. Het hoofdstuk toont het werkingsprincipe aan in patiënten tijdens coronaire bypass chirurgie. De index bleek gevoeliger voor kleine veranderingen van het intravasculaire draineerbare volume dan klassieke parameters, hetgeen suggereert dat de DFI beter in staat is om veneuze drainage te meten en te observeren.

Een pompregeling welke DFI metingen combineert met aanpassing van de pompsnelheid resulteert in een aanbodgestuurde debiet-regeling. Hoofdstuk 5 toont de werking van een dergelijke aanbodgestuurde debiet-regeling, toegepast in een experimentele ELS opstelling waarin DFI metingen continu het draineerbare veneuze intravasculaire volume bepalen en waarbij de pompsnelheid wordt aangepast wanneer het draineerbare volume onder een grenswaarde geraakt. Zo is het mogelijk om ook bij lage vulling de maximaal beschikbare ondersteuning te leveren.

Het gebruik van de DFI om het draineerbare veneuze volume te bepalen kan toepassing vinden om veranderingen in cardiale pompreserve te detecteren tijdens weanen van ELS. Hoofdstuk 6 presenteert een casus van een ELS-patiënt bij wie regelmatig DFI's werden bepaald. Gedurende pogingen de patiënt te weanen (afname in bypass debiet waarbij als gevolg het hart wordt belast) bevestigde de

DFI bevindingen van cardiale pompfunctie zoals gevonden door transoesophageale echocardiografie en standaard bloeddrukmetingen.

Tot slot presenteert Hoofdstuk 7 een communiqué aan de redacteur van het blad 'Artificial Organs'. De brief bediscussieert een ELS circuit dat gebruik maakt van een pulsatiele centrifugale pomp zoals gepresenteerd door de groep van Herreros. Ook is de reactie van deze Spaanse groep opgenomen.

Deze dissertatie levert een eerste stap in de ontwikkeling naar een ELS systeem dat in staat is mechanische cardiopulmonale ondersteuning aan te passen aan het cardiovasculaire systeem van de patiënt. De resultaten van de studies welke hier zijn gepresenteerd zijn dienstig om de interactie tussen het extracorporele circuit en het vasculaire systeem van de patiënt te begrijpen. Een diepgaand begrip van deze interactie is cruciaal voor het optimaliseren van cardiopulmonale ondersteuning.





## ZUSAMMENFASSUNG

Extrakorporale Kreislaufunterstützungssysteme (extracorporeal life support, ELS) bieten mechanische kardiopulmonale Unterstützung, indem sie das Herz entlasten und die Organsperfusion gewährleisten. Bei veno-arterieller ELS wird intravaskuläres Blutvolumen direkt aus dem venösen Kreislauf genommen und durch eine Kunstlunge in den arteriellen Kreislauf gepumpt. Dies geschieht vielfach durch eine Zentrifugalpumpe. Heutzutage findet ELS Anwendung bei unter anderem (post-kardiotomie) Herzversagen, perkutanen Eingriffen und akutem Lungenversagen.

Die physikalische und hämodynamische Wechselwirkung zwischen dem ELS-System und dem Patientenkreislauf in Bezug auf das venöse intravaskuläre Volumen wird in Kapitel 2 untersucht. Hierbei wird das Gleichgewicht zwischen Volumenangebot und Volumenbedarf herausgearbeitet. Das Kapitel liefert das Grundprinzip einer neuen Methode, das Manipulationen der Pumpendrehzahl verwendet, um ein Kollabieren der venösen Gefäße aufgrund niedrigen Füllvolumens zu erkennen und zu beheben.

Die venöse Drainage beginnt bei den Einlassöffnungen der venösen Kanüle. Kapitel 3 untersucht Konstruktionen von Einlassöffnungen von fünf verschiedenen Kanülen welche bei der zentralvenösen Kanülierung Verwendung finden. Wenn bei kritisch niedrigem Füllvolumen die Kanüleneinlassöffnungen blockiert werden, zeigt eine Kanülenkonstruktion mit verdrehten Gruben an der Spitze einen leicht besseren Drainagefluss. Bei ausreichendem Füllvolumen zeigte die Studie jedoch keinen Leistungsunterschied zwischen den unterschiedlichen Kanülenkonstruktionen.

Bei Patienten, die mit einem minimalisierten extrakorporalen Bypasssystem unterstützt werden, kann mittels des dynamischen Füllungsindex (dynamic filling index, DFI) das intravaskuläre Volumen abgeschätzt werden. Kapitel 4 zeigt das Wirkungsprinzip von DFI-Messungen an Patienten welche eine koronare Bypassoperation untergehen. Hier bewies sich der Index als genaueres Mass für kleine Änderungen des intravaskulären drainierbaren Volumens als routinemäßig aufgezeichnete Parameter. Das suggeriert, dass sich DFI eignet um den venösen Rückfluss bei ‚on pump‘ Anwendungen zu überwachen.

Eine Pumpenregelung, die DFI Messungen mit automatischer Anpassung der Pumpendrehzahl kombiniert, ergibt eine volumenangebot-gesteuerten Pumpenregelung. Kapitel 5 zeigt eine derartige Pumpenflussregelung und ihre Wirkung in einer experimentellen ELS-Anwendung. Hierbei werden zur Überwachung des drainierbaren venösen intravaskulären Volumens DFI Messung angewendet. Die Pumpendrehzahl wird angepasst, wenn das drainierbare Volumen unterhalb eines Schwellenwertes gerät. So ist es möglich auch bei niedrigem Füllvolumen den maximal zur Verfügung stehenden Pumpenfluss zu gewährleisten.

Die Verwendung des DFI als Instrument um das venöse Volumen zu abzuschätzen kann womöglich auch verwendet werden um beim Entwöhnung vom ELS Verän-

derungen der kardialen Pumpreservekapazität zu erkennen. Kapitel 6 zeigt ein Fallbericht von einem ELS-Patienten bei dem regelmäßig DFI-Messungen durchgeführt wurden. Bei Entwöhnungsversuche (d.h. Abnahme des Bypassflusses und somit eine Wiederbelastung des Herzens) konnte der DFI die Befunde kardialer Pumpfunktion, die durch transösophageale Echokardiographie und standard Blutdruckmessung gefunden waren bestätigen.

Zum Schluss zeigt Kapitel 7 ein Communiqué an den Editor der Zeitschrift ‚Artificial Organs‘. Der Brief diskutiert einen ELS-Kreislauf unter Verwendung einer neuen pulsatilen Zentrifugalpumpe, die von der Gruppe von der Herreros vorgestellt wurde (Zusammenfassung und Abbildungen im Anhang). Darüber hinaus ist auch die Antwort der spanischen Gruppe gegeben.

Diese Arbeit stellt ein erster Schritt in der Entwicklung zu einem ELS-System dar, das mechanische Kardiopulmonale Unterstützung an das Kardiovaskuläre System des Patienten anpassen kann. Die Ergebnisse der hier vorgelegten Studien mögen hilfreich sein, um die Interaktion zwischen dem extrakorporalen Kreislauf und dem vaskulären System des Patienten zu verstehen. Ein tiefgreifendes Verständnis dieser Interaktion ist zur Optimalisierung der Kardiopulmonalen Unterstützung unerlässlich.



## SOMMAIRE

Les Systèmes extracorporel life support (ELS) livrent une assistance mécanique cardio-pulmonaire en soulageant le cœur de manière hémodynamique et en soutenant la perfusion des organes. ELS en situation veino-artériel prends le volume nécessaire directement du système veineux pour être pompé à travers l'oxygénateur vers le système artérielle. ELS se voit appliqué dans un large spectre de pathologies, défaillance cardiaque (post cardiectomie), interventions en défaillance pulmonaire.

L'Interaction physique entre le système ELS et le volume intra vasculaire veineux du patient, est étudié en Chapitre 2. Cela nous livre une rationnelle pour une nouvelle méthode qui va manipuler les variations de la vitesse de la pompe à fin de détecter et de corriger de manière intelligente un collapsus veineux suite au remplissage circulatoire insuffisant.

Le drainage veineux est affecté par l'ouverture d'entrée de la canule veineuse. Chapitre 3 recherche la différence entre les concepts de canules, utilisés pour la canulation centrale veineuse. Au moment précis où le volume intra vasculaire atteint un niveau extrêmement critique avec une obstruction de l'ouverture d'entrée de la canule, nous constatons que les canules avec un concept au rainures torsadées permettent une capacité de drainage meilleure. Contrairement à la situation critique, où le volume de remplissage était extrêmement basse, l'étude n'a pas pu démontrer des différences parmi les concepts des canules quand le volume de drainage était suffisant.

Chapitre 4 introduit l'indexe de remplissage dynamique (dynamic filling index, DFI) permettant de déterminer le volume intra vasculaire chez les patients en traitement ELS. Le chapitre démontre le principe de fonctionnement chez les patients subissant une chirurgie de pontage aortocoronarien. L'index se montre plus sensible aux changements très minimes du volume de drainage du systémique intra vasculaire, ce qui suggère que le DFI est un meilleur paramètre d'observation dans la mesure du drainage veineux.

Un système de régulation de la pompe qui combine le DFI et la vitesse de rotation de la pompe ayant comme résultat la régulation de débit en fonction du volume de drainage. Chapitre 5 montre le fonctionnement d'un système de régulation de débit en fonction du volume de drainage, appliqué au ELS en position expérimentale en mesurant en continu le DFI et en paramétrant le volume de drainage intra vasculaire disponible et en adaptant la vitesse de la pompe quand la limite du volume de drainage est atteinte. Ainsi, il devient possible d'offrir une assistance maximale avec un volume de drainage très bas.

L'Utilisation du DFI pour déterminer le volume de drainage peut trouver son application dans la détection de changements de réserve de la fonction cardiaque du patient pendant la sortie de pompe, sevrage du ELS. Chapitre 6 présente le cas d'un patient ELS sur lequel nous avons, de manière régulière, déterminé le DFI. Pendant les tentatives de sevrage du système ELS (diminution graduelle du débit

de pompe avec comme but la reprise de la fonction cardiaque propre au patient lui-même), le DFI confirmait les observations de la fonction cardiaque comme confirmé par les observations de l'échographie transoesophagienne et la prise de tension artérielle conventionnelle.

Pour terminer, le chapitre 7 présente un communiqué au rédacteur du journal 'Artificial Organs'. La lettre amène la discussion sur l'utilisation d'une pompe centrifuge en mode pulsatile dans un circuit ELS, étude présentée par le groupe de Herreros (synthèse et images en annexe). La réaction du groupe espagnole est également décrite.

Cette dissertation fournit un premier pas dans le développement d'un système ELS qui serait capable d'adapter l'assistance cardio-pulmonaire mécanique au système cardiovasculaire du patient. Les résultats de ces études présentés ici, nous servent à comprendre l'interaction du circuit extracorporelle et le système cardiovasculaire du patient. La compréhension profonde de cette interaction est cruciale pour l'optimalisation du support cardio-pulmonaire.